

Article, Published Version

Kiekbusch, Manfred

Elektrisches Messen von Volumenänderungen beim Triaxialversuch

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102981>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kiekbusch, Manfred (1977): Elektrisches Messen von Volumenänderungen beim Triaxialversuch. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 41. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 111-120.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



M. K i e k b u s c h

ELEKTRISCHES MESSEN VON VOLUMENÄNDERUNGEN BEIM TRIAXIALVERSUCH

Electrical Measurement of Volume Changes
during the triaxial Test

Zusammenfassung

Die ständig komplizierter werdenden Versuchstechniken im bodenmechanischen Laboratorium, vor allem bei den Scherfestigkeitsprüfungen, erfordern ein automatisches Erfassen von Meßwerten und die Auswertung über eine EDV-Anlage. Um den Vorteil der automatischen Meßwertverarbeitung für alle anfallenden Meßwerte ausnutzen zu können, war es notwendig, ein elektrisches Volumenmeßgerät zu entwickeln, da Geräte dieser Art nicht von der Industrie angeboten werden. Die Genauigkeit des Gerätes beträgt beim Nennmeßbereich von $25 \text{ cm}^3 \pm 0,01 \text{ cm}^3$. Wird der Nennmeßbereich auf ca. 3 cm^3 verringert, kann die Genauigkeit auf $\pm 0,001 \text{ cm}^3$ gesteigert werden.

Summary

The development of more sophisticated soil-testing techniques call for automatic acquisition and evaluation of test data by electronic computers. To take advantage of this automatic data-processing for the measurements of volume change a special apparatus for the electric measurement of volume change had to be developed. The accuracy of this apparatus is $\pm 0,01 \text{ cm}^3$ within a measuring range of 25 cm^3 . A reduction of the measuring range to 3 cm^3 increases the accuracy to $\pm 0,001 \text{ cm}^3$.

I n h a l t

	Seite
1. Einleitung	113
2. Meßwerteinrichtungen	113
3. Problemstellung	113
4. Gerätebeschreibung	115
5. Eichung	116
6. Korrektur	117
7. Zusammenfassung	118
8. Literatur	119

1. Einleitung

In den letzten Jahren wurden im bodenmechanischen Laboratorium der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg die Triaxialgeräte technisch verbessert und damit die Einordnung in die neueste internationale Entwicklung erreicht.

Zu den Verbesserungen gehören die Ausschaltung des Reibungseinflusses bei der Axiallastübertragung, Einbauten zur wahlweisen Anwendung kraft- und weggesteuerter Scherbelastung und vor allem die Möglichkeit der Probensättigung durch das Gegendruckverfahren (back pressure) als Voraussetzung für die Durchführung konsolidierter, undrännierter Scherversuche mit Porenwasserdruckmessung (CU-Versuch), dem wichtigsten Routineversuch.

Da bei diesen neuen Versuchstechniken erheblich mehr Meßwerte anfallen und die Kapazität der teuren Versuchsgeräte optimal ausgenutzt werden soll, kann auf eine weitgehende Automatisierung des Versuchsbetriebes nicht verzichtet werden. Durch den Kauf einer automatischen Vielstellenmeßanlage mit den entsprechenden Meßwertaufnehmern und durch die Speicherung der Meßwerte parallel zu einem Digitaldrucker auf Lochstreifen können jetzt die automatisch erfaßten Meßwerte über eine EDV-Anlage ausgewertet werden und liefern das komplette Ergebnis der Scherversuche.

Um den Vorteil der automatischen Meßwernerfassung für alle anfallenden Meßwerte beim Triaxialversuch ausnutzen zu können, war es notwendig, ein spezielles Meßwertaufnehmersystem zur Messung von Volumenänderungen während der Konsolidierungsphase und bei drännierten Scherversuchen zusätzlich beim Abscheren zu entwickeln.

2. Meßeinrichtungen

Bei den triaxialen Scherversuchen müssen während der in Sättigung, Konsolidierung und Abscherung unterteilten Versuchsphasen unterschiedliche Meßwerte in bestimmten Zeitabständen festgehalten werden.

Meßwerte sind die Probensetzungen (Wege), die Vertikalkräfte, die Zell- und Porenwasserdrücke und die Volumenänderungen. Zur Messung von Wegen, Kräften und Drücken werden von der Industrie ausreichend viele Meßwertaufnehmertypen, passend in Meßbereich und Genauigkeit, angeboten. Zur Messung von Volumenänderungen der Probe über das ausgepreßte Porenwasser sind Aufnehmer nicht erhältlich. Es gibt nur Hinweise in der englischsprachigen Literatur auf einige Geräteentwicklungen an Instituten, die sich jedoch nicht in unsere Anlagenkonzeption übertragen ließen.

3. Problemstellung

Zur Durchführung eines triaxialen Scherversuches wird eine Bodenprobe in eine Druckzelle (Abb.1) eingebaut und einem axialsymmetrischen Spannungszustand ($\sigma_3 = \sigma_2, \sigma_1$) ausgesetzt. In der Bodenprobe wirkt über das Gegendrucksystem ein vorgegebener Porenwasserdruck (u). Die Differenz zwischen den äußeren Spannungen und dem Porenwasserdruck entspricht den effektiven Spannungen ($\sigma'_1 = \sigma_1 - u, \sigma'_3 = \sigma_3 - u$), unter denen die Probe konsolidiert

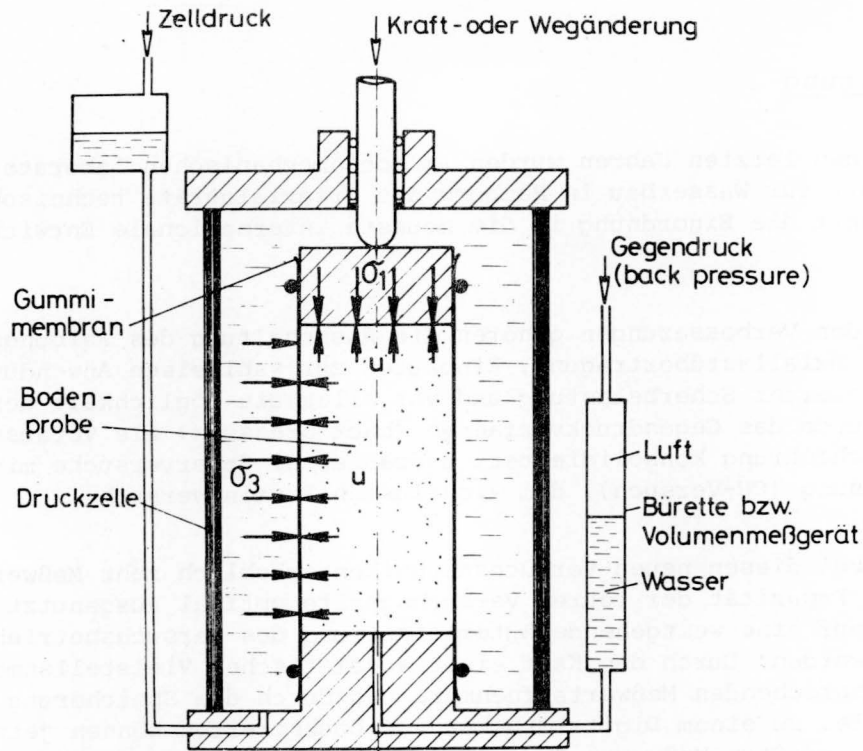


Abb. 1 Systemskizze zum Dreiaxialversuch

und Porenwasser in das Gegendrucksystem abgibt. Je nach Zweck des Versuchs wird die Bodenprobe nach Beendigung der Konsolidierung in der Regel durch Erhöhung der Vertikalspannungen (σ_1) undränniert oder dränniert abgeschert. Beim drännierten Versuch muß während des Abscherens kontinuierlich kontrolliert werden, wieviel Porenwasser die Probe abgibt bzw. durch Auflockerung wieder aufnimmt. Bei diesen Langzeitversuchen ist die automatische Meßwert-erfassung besonders wichtig.

Um einen Meßwertaufnehmer für möglichst alle vorkommenden Bodenarten und Versuche einsetzen zu können, mußten folgende Vorbedingungen bei den Konstruktionsüberlegungen berücksichtigt werden:

1. Der Druck im Sättigungssystem muß bis 12 bar gesteigert werden können.
2. Die zu messende Porenwassermenge soll mindestens 25 cm^3 betragen.
3. Die Genauigkeit soll bei $0,01 \text{ cm}^3$, das sind $0,01 \%$ von dem Volumen der Standardproben mit $F = 10 \text{ cm}^2$ und $h = 9,0 \text{ cm}$, liegen.
4. Ein vorhandener ohm'scher Meßverstärker, dessen Meßbereich für die Kraftaufnehmer zum Messen der Vertikalkräfte bereits so kalibriert ist, daß 500 kp in 5000 Ziffernschritten aufgeteilt sind, sollte so eingesetzt werden, daß die Porenwassermenge dimensionsgerecht ablesbar ist.
5. Die notwendigen elektronischen Bauteile sollen Industrie-Fertigprodukte mit bekannten technischen Daten, wie Nennlast, Genauigkeit, Temperaturverhalten usw. sein, um möglichst viele Fehlermöglichkeiten von vornherein auszuschließen.
6. Die Volumenänderungen des Porenwassers sollen, wie in einem Teil der Literaturhinweise vorgeschlagen, über die Wägemethode (Volumen = Masse/Dichte) bestimmt werden.

Unter diesen Voraussetzungen wurde zunächst passend zum Meßverstärker ein ohm'scher Kraftaufnehmer mit der kleinsten im Handel angebotenen Nennlast von 500 p beschafft. Diese Nennlast mußte in $500 \cdot 10$ Zifferschritte aufgelöst werden, um die angestrebte Genauigkeit von $0,01 \text{ cm}^3$ zu erhalten. Da der freie vorkalibrierte Meßkanal nur eine Spreizung auf 5.000 Einheiten zuließ, konnte eine höhere Auflösung nur auf mechanischem Wege erfolgen. Hierzu bot sich die in der Wägetechnik übliche Kraftverstärkung über eine Hebelarmübersetzung an. Wie später noch beschrieben wird, brachte dieser Konstruktionsweg weitere Vorteile.

4. Gerätebeschreibung (Abb.2)

Auf einer Grundplatte befindet sich eine Auflagerstütze (1) mit zwei in Bohrungen eingeklebten, gehärteten Spitzen (2). Diese dienen über die angekörnte Gegenlagerplatte (3) als nahezu reibungsfreie Auflager für den Hebelarm (4). Die Kraftmeßdose (5) ist zu Justierzwecken auf einer zu der Grundplatte (6) verschieblichen Zwischenplatte (7) festgeschraubt. Der Hebelarm ist mit der Kraftmeßdose über einen Bügel mit längenverstellbarer Gliederkette (8) verbunden. Der Anschluß dieser Verbindung an den Hebelarm erfolgt über ein einzelnes Spitzenlager (9) und an die Kraftmeßdose durch eine Bügelsteckkupplung (10). Am kürzeren Hebelarmende dient ein verstellbares Gegengewicht (11) dem kontrollierbaren Einstellen einer Zugkraft als Vorspannung der Kraftmeßdose. Besonders zu beachten ist, daß alle Auflager in einer Ebene (12-13) liegen, da sich sonst vor allem bei größeren Hebelarmübersetzungen eine Nichtlinearität der Meßwerte ergibt.

Zur Aufnahme der Porenwasser-Meßmenge ist ein beidseitig geschlossenes Plexiglasrohr (14) für einen maximalen Betriebsdruck von 12 bar am längeren Hebelarmende angebracht. Dieser Behälter hängt mittels eines Bügels mit Spitzenlager (15) an einem verstellbaren Auflager (16), welches

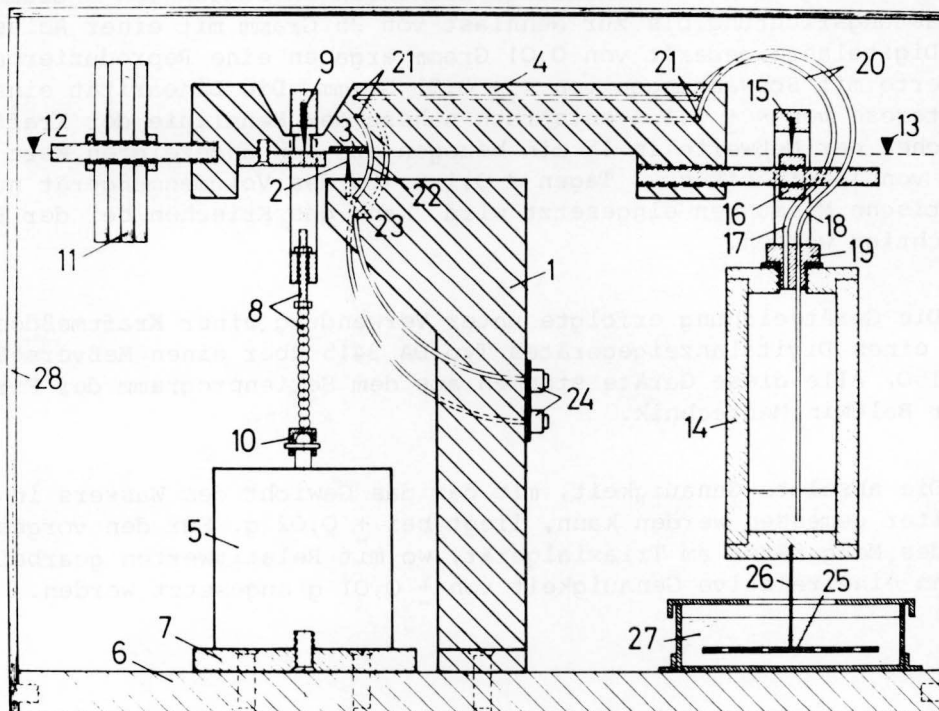


Abb. 2 Darstellung des Volumenänderungsmeßgerätes

durch Verschiebung die Einstellung einer bestimmten Hebelarmübersetzung (Kalibrierung) zuläßt. Die Zuleitungen für den Luftgegendruck (17) und das Porenwasser (18) führen vom durchbohrten Einschraubstopfen (19) am Kopf des Auffangbehälters in Schlaufen (20) und über Klemmbohrungen (21) zum Auflager (2) des Hebelarmes. In diesem Bereich, wo sich Rückstellkräfte durch die Verformungen der Leitungen am wenigsten auswirken, werden die Leitungen wiederum in Schlaufen (22) durch die Auflagerstütze (23) zu den Anschlußteilen (24) geführt. Von dort aus können die Anschlußleitungen in beliebigen Querschnitten und auch starr weitergeführt werden.

Die Zuleitungen und die Leitungsführung waren ein wesentliches Problem bei dieser Geräteentwicklung, denn die Leitungen sollten einem Druck von 12 bar bei geringer Ausdehnung standhalten und dabei möglichst flexibel sein, um Rückstellkräfte auf das Gesamtsystem und damit verbundenes Kriechen des Meßwertes zu vermeiden. Als Material erwies sich die Kunststoffummantelung von Klingeldraht mit einem Innendurchmesser von 0,6 mm und einer Wandstärke von 0,4 mm als geeignet. Diese kleine Nennweite der Leitungen reicht aus, da die Durchlässigkeit der Proben weitaus geringer ist.

Zur Vermeidung von Eigenschwingungen durch Erschütterungen des Gerätes ist am unteren Ende des Auffangbehälters eine Lochplatte (25) an einem dünnen Stahldraht (26) befestigt, die - in einem Ölbad (27) hängend - als Dämpfung wirkt. Der Befestigungsdraht wurde mit 0,5 mm Ø gewählt, um die Auftriebskräfte und die Adhäsionsfläche möglichst klein zu halten. Das gesamte Gerät ist von einem Schutzkasten (28) umgeben.

5. Eichung

Das Eichen des Gerätes erfolgt mit Eichgewichten, die an den Auffangbehälter angehängt werden. Mehrmalige Eichungen in Stufen von 5 Gramm in Be- und Entlastungsrichtung bis zur Nennlast von 25 Gramm mit einer Ablesegenauigkeit am Digitalanzeigegerät von 0,01 Gramm ergaben eine Reproduzierbarkeit der Meßwerte mit Schwankungen von $< \pm 0,01$ Gramm. Die Linearität einschließlich Hysterese von $< \pm 0,1$ % entsprach nahezu der Kennlinie der Kraftmeßdose. Das Kriechen der Meßwerte in 15 min bezogen auf den angezeigten Wert war $< 0,2$ %, von 15 min bis zu 3 Tagen $< 0,1$ %. Da das Volumenmeßgerät nur für quasistatische Messungen eingesetzt wird, kann das Kriechen bei der Eichung berücksichtigt werden.

Die Geräteeichung erfolgte unter Verwendung einer Kraftmeßdose Typ U 1/500, eines Digitalanzeigegerätes Typ DA 3415 über einen Meßverstärker Typ MG 3150. Alle diese Geräte stammen aus dem Serienprogramm der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik.

Die absolute Genauigkeit, mit der das Gewicht des Wassers im Auffangbehälter gemessen werden kann, liegt bei $\pm 0,02$ g. Für den vorgesehenen Einsatz des Meßgerätes am Triaxialgerät, wo mit Relativwerten gearbeitet wird, kann eine relative Genauigkeit von $\pm 0,01$ g angesetzt werden.

6. Korrektur

Die Eichung des Meßwertaufnehmers in Gramm und die angenommene Gleichsetzung von 1 Gramm Wasser gleich 1 cm³ Wasservolumen reicht für den Anwendungsfall nicht aus. Die geforderte Genauigkeit von $\pm 0,01$ g verlangt, daß die im Auffangbehälter befindliche Luftmasse, die je nach Fließrichtung verdrängt bzw. hineinfließt, berücksichtigt wird. Die Volumenänderung ΔV erhält man zu

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_W - (\rho_L \cdot P)} \quad (1)$$

$$\Delta V = \text{Volumenänderung des Porenwassers} \quad (\text{cm}^3)$$

$$\Delta m = \text{gemessene Massendifferenz} \quad (\text{g})$$

$$\rho_W = \text{Dichte des Wassers} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\rho_L = \text{Dichte der Luft} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$P = \text{Gesamtdruck} \quad (\text{bar})$$

(Atmosphärendruck + Gegendruck)

Die Luftdichte ρ_L beträgt bei 20°C und Atmosphärendruck $\approx 0,0012$ g/cm³. Unter gleichen äußeren Bedingungen wird die Dichte des Wassers mit $\rho_W = 0,99823$ g/cm³ angegeben. Um eine dimensionsgerechte Anzeige in cm³ zu erhalten und eine Umrechnung zu vermeiden, kann es zweckmäßig sein, das Volumenmeßgerät gleich auf einen bestimmten Sättigungsdruck hin zu kalibrieren. Im bodenmechanischen Laboratorium der BAW in Hamburg wird routinemäßig ein Gegendruck von ≈ 5 , selten > 7 bar, zum Sättigen der Bodenproben aufgebracht. Das Volumenmeßgerät wurde für 6 bar Sättigungsdruck geeicht; dabei entspricht nach Gleichung (1)

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{0,99823 - 0,0012 \cdot (6 + 1)}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{0,98983}$$

1 Gramm Massendifferenz einer Volumenänderung von 0,98983 cm³.

Weicht der gewählte Versuchssättigungsdruck um 1 bar vom Eichgegendruck ab, so beträgt der Fehler nur 0,1 % vom angezeigten Meßwert und kann in der Regel vernachlässigt werden.

Eine andere Möglichkeit, bei gleichzeitiger Herabsetzung des Nennmeßbereichs auf ca. 3 cm³ die druckabhängige Korrektur zu vermeiden, besteht darin, zwischen Porenwasser und Luftgegendruck Quecksilber als Trennflüssigkeit einzusetzen (Abb.3). Es ist jedoch zu bedenken, daß die Schwierigkeiten bei der Entlüftung, die größeren Leitungslängen und die eventuelle Zunahme von Leckagestellen von Nachteil sind.

Ist es für spezielle Messungen notwendig, sehr kleine Volumenänderungen zu messen, ermöglicht die Verwendung von Quecksilber wegen seiner hohen

Dichte den Einsatz des beschriebenen Volumenmeßgerätes ohne Umbau für eine zehnmal höhere Genauigkeit.

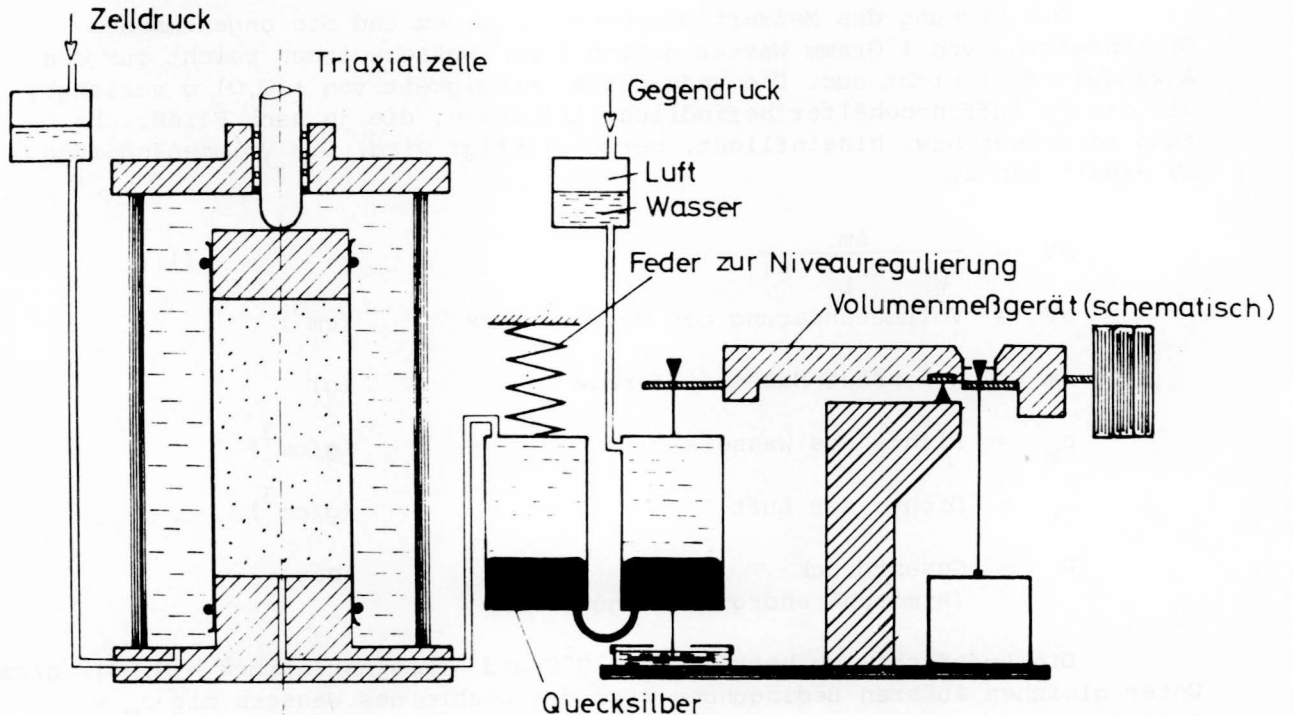


Abb. 3 Dreiaxialzelle und Volumenänderungsmeßgerät

7. Zusammenfassung

Die zunehmende Automatisierung des Versuchsbetriebes im bodenmechanischen Laboratorium erfordert neben den elektrischen Standardmeßanlagen und -aufnehmern für Druck, Weg und Kraft einen speziellen Meßwertaufnehmer zur Messung von Porenwassermengen. Beim Triaxialversuch dienen diese Messungen zur automatischen Bestimmung von Konsolidierungszeiten, Volumenänderungen und Durchlässigkeiten. Ein Hauptanlaß dieser Geräteentwicklung war es, anisotrope Konsolidationsvorgänge mit Hilfe von Regelkreisen zu steuern. Wird die Genauigkeit des Volumenmeßgerätes durch das Einschalten von Quecksilber als Trennflüssigkeit auf $0,001 \text{ cm}^3$ erhöht, so kann dieses Gerät über einen Regelkreis auch als Porenwasserdruckgeber nach dem Kompensationsverfahren eingesetzt werden.

Das hier beschriebene Gerät ist mit einfachen Mitteln herzustellen und kann mit allen Arten von Kraftaufnehmersystemen bestückt werden. Durch die variable Hebelarmübersetzung ist eine Anpassung an unterschiedliche Nennmeßbereiche leicht möglich. Die Geräteeichung ist durch Anhängen von Eichgewichten unproblematisch. Die beim Prototyp (Abb.4) erreichte absolute Genauigkeit von $< \pm 0,02 \text{ cm}^3$ bei einem Nennmeßbereich von 25 cm^3 läßt sich durch den Einsatz genauerer Kraftaufnehmer und größerer Verstärkerauflösung oder durch die Verwendung von Quecksilber noch erhöhen. Die Handhabung macht keine Schwierigkeiten, da ein genaues Ausrichten des Gerätes nicht erforderlich ist, es keine Entlüftungsprobleme gibt und auch Erschütterungen durch die eingebaute Dämpfung kompensiert werden. Während des bisherigen, zweijährigen Einsatzes hat sich das Konstruktionsprinzip des Volumenmeßgerätes in allen Punkten bewährt.

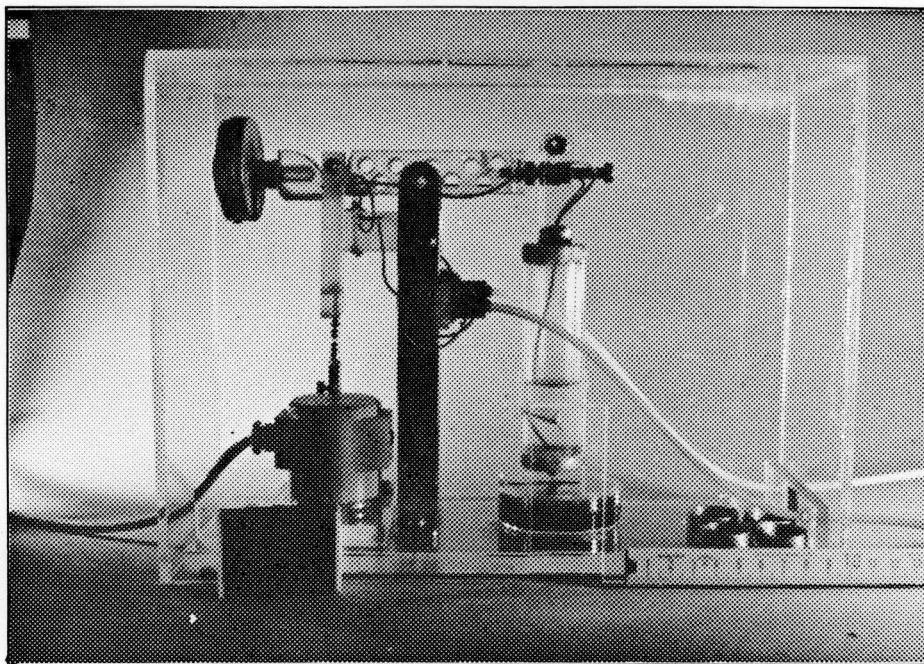


Abb. 4 Ansicht des Volumenänderungsmeßgerätes

8. Literatur

- [1] DARLEY : Discussion on apparatus for measuring volume change suitable for automatic logging. Geotechnique 23 (1973), S.140-141
- [2] IRWIN : Discussion on use of servo mechanismus for volume change measurement and K_0 -consolidation. Geotechnique 22 (1972), No.1, S.186-187
- [3] KLEMENTEV : Lever-type apparatus for electrically measuring volume change. Geotechnique 24 (1974), No.4, S.670-671
- [4] LEWIN : Use of servo mechanismus for volume change measurement and K_0 -consolidation. Geotechnique 21 (1971), No.3, S.259-262
- [5] MENZIES : A device for measuring volume change. Geotechnique 25 (1975), No.1, S.133-134
- [6] MITCHELL u. BURN : Electronic measurement of changes in the volume of pore water during testing of soil samples. Canadian Geotechnical Journal (1971), Vol.8, S.341-345
- [7] ROWLANDS : Apparatus for measuring volume change suitable for automatic logging. Geotechnique 22 (1972), No.3, S. 525-526.

